

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630440

研究課題名(和文) 空気液化サイクルを付加した高効率の複合火力発電システムの研究

研究課題名(英文) High-efficiency combined thermal electric power generation cycle integrated with air-liquefaction cycle

研究代表者

平田 邦夫(Hirata, Kunio)

静岡大学・工学研究科・教授

研究者番号：60422739

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はロケットエンジン技術の空気液化サイクルを、現在主流を占めている複合サイクル火力発電システムに組み込むことにより、熱効率の飛躍的な向上を試みることを目的としている。液化コストの問題を解決する新しいシステムを考案し、このシステムの数理モデルを作成、シミュレーションを実施した。提案するシステムでは、燃料をLNGから液体水素に置き換えるとともに、液体水素の冷熱を利用して空気中の酸素を液化する空気液化サイクルを付加する。それぞれの方式における圧縮比等を適切に設定することにより、統合システムとして最大73%の熱効率を得ることが可能であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Air-liquefaction cycle using in rocket engine system were integrated with the combined thermal electric power generation cycle in this study. Main objective of this study was to increase the thermal efficiency of the cycle. A new system involving solution of the cost for air-liquefaction was proposed. Mathematical model was constructed for analyzing this system and simulations were conducted. The proposed system replaces LNG fuel with liquid hydrogen. Moreover, air-liquefaction cycle is mounted using cold energy of the liquid hydrogen. The pressure ratio of the each component was optimized and we achieved 73 % of the thermal efficiency at a maximum as the combined system.

研究分野：推進工学

キーワード：複合発電 液体水素 空気液化

1. 研究開始当初の背景

現在の新型 LNG 火力発電所は、ガスタービンで発電を行い、その高温排熱で蒸気タービンを駆動する複合サイクルの採用により、60%に達する高い熱効率を得ている。しかしガスタービンは、密度の低い空気を高圧に圧縮することから、コンプレッサの圧縮仕事が大きく、大きな発電仕事 (= タービン発生出力 - コンプレッサ圧縮仕事) を取り出し難い。一方、ロケットエンジンは、密度の高い液体を昇圧するので、液体ポンプの圧縮仕事 (液体の昇圧に必要な仕事) は、気体の圧縮仕事に比べると、数 100 分の 1 程度と極端に小さい。この点に着目して、ロケットエンジンの液体技術を複合火力発電に応用ことを着想した。

2. 研究の目的

本研究では、提案する新システムについて、以下のことを明確にする。

- (1) 新システムが達成可能な熱効率
- (2) 新システムの実現性と最適な設計点

加えて、本システムの最大の技術課題と考えられる空気液化システムについて、基礎的な熱交換実験を行い問題点を抽出し、その解決を図る。

提案する発電システムが飛躍的に高い熱効率を発揮することが示され、研究成果が持続可能で環境に優しい新たな発電システムの普及に繋がれば、未来社会に大きく貢献することができる。

3. 研究の方法

(1) 液体発電システムの最適設計点

液化水素を燃料とする液体ポンプ方式の発電システム (図 1) を対象として、発電システムの数学モデルを構築することにより、燃焼室の燃焼圧力や水蒸気の噴射流量をパラメータとして、液体発電システムの熱効率を算出する。

この計算結果を整理して、空気液化サイクル方式の発電システムについて、熱効率が最大となる最適な設計作動点を見出す。

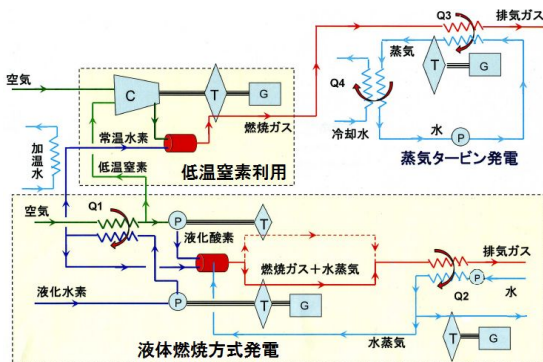


図 1 提案するシステム

(2) 熱交換器の試験装置の製作

本研究の発電システムは、熱交換器を用いて液化水素の冷熱で空気を液化する。空気液

化サイクルのロケットエンジン技術に基づいて、液化窒素による熱交換器の試験装置を製作する。液化窒素を用いて、熱交換器の基礎試験を行う。

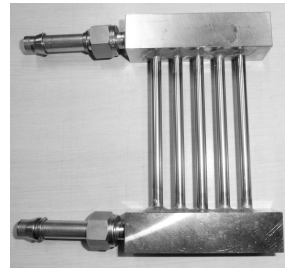


図 2 実験で使用した熱交換器

4. 研究成果

(1) 提案するシステムの概要

提案する複合火力システムの概要図を図 1 に示す。このシステムは、複合火力発電の燃料を通常の液化天然ガスから液化水素に変更すると共に、液体水素の冷熱を利用して空気中の酸素を液化する空気液化サイクルを付加したものであり、液体昇圧と液体燃焼方式を特徴としている。また、本研究の提案システムは、液体燃焼方式の発電部分とガスタービン方式の発電部分から構成される。

液体燃焼方式の発電部分では、極めて高温の燃焼ガスに水蒸気を混入して、タービンに流入するガスの温度を調整する。タービンから流出する高温ガスの熱を利用して、高圧の水を沸騰させて水蒸気を発生させるが、この水蒸気は前述したように燃焼ガスに混入することにより、大型の蒸気タービンを省くように工夫している。

また、液化水素の冷熱を用いて空気から液化酸素を生成する際には、低温の気体窒素も同時に生成される。この低温の気体窒素は、ガスタービン方式の発電部分に導いて、ガスタービンの圧縮機入口の空気冷却に使用する。低温の空気は密度が高くなることから、圧縮仕事が低減することになり、システムの熱効率が向上する。

(2) 計算手順

液体燃焼方式の発電部分とガスタービン方式の発電部分に対する計算フロー図を、それぞれ図 3, 4 に示す。

液体燃焼方式の発電部分の計算では、圧力比を変化させて熱効率を算出するプログラムとなっており、これにより最適な燃焼圧力を算出することができる。この際、燃焼温度を固定して、その燃焼温度となるように燃焼室への蒸気噴射量を決定している。

ガスタービン方式の発電部分の計算では、多く取り込む空気の量を仮定して、水素の発熱量と燃焼ガスのエンタルピ上昇量のバランスから燃焼温度を算出し、熱効率の算出に用いる。

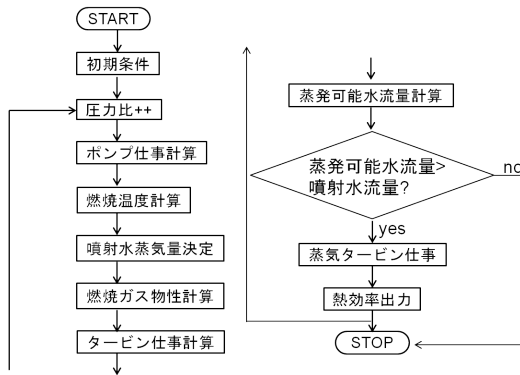


図3 液体燃焼方式部分の計算フロー

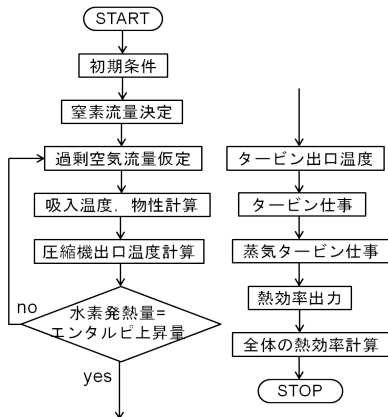


図4 ガスタービン方式部分の計算フロー

(3) 計算結果：液体燃焼方式の発電部分

液体燃焼方式の発電部分の熱効率を図5に示す。液体燃焼方式の発電では広範な圧力比において80%の熱効率を達成しており、現在のLNG複合火力発電システムの熱効率60%に比べて、熱効率が飛躍的に向上することが分かる。

圧力比が高くなると若干ではあるが熱効率が下がる傾向がある。これは、圧力比が高くなるにつれてタービンの効率(出力)が大きくなり、その分タービンから排出する熱量が小さくなる。このため、水の沸騰に利用される熱量も小さくなり、蒸気による発電量が減少するために、熱効率が低下すると考えられる。なお、燃焼圧が水の臨界圧力となる圧力比220を圧力比の限界値としている。

(4) 計算結果：複合サイクルの熱効率

ガスタービン方式の発電部分(ガスタービンに流入する空気を低温の窒素ガスで冷却した場合)は、熱効率が66%まで向上することから、通常のLNG複合火力システムに比べると、この発電部分の熱効率は6%向上することが分かる。液体燃焼方式の発電部分とガスタービン方式の発電部分から構成されるシステムの全体としての熱効率を図6に示す。広範な圧力比において、システム全体の熱効率は70%を越えており、最大値は73%に達することが分かった。

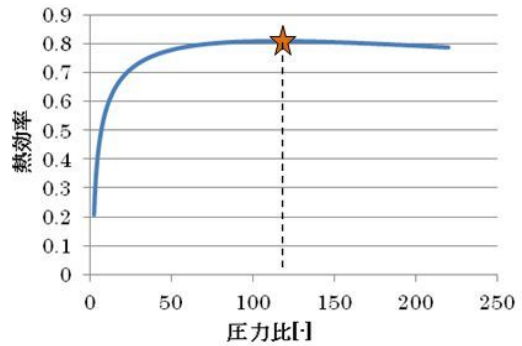


図5 液体燃焼方式の発電部分の熱効率

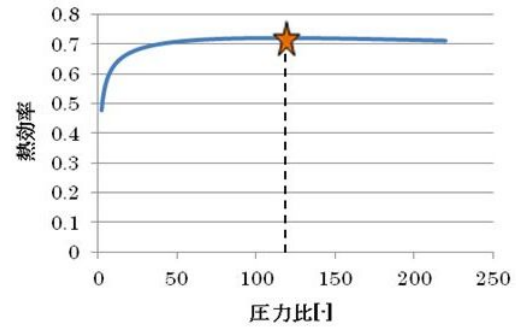
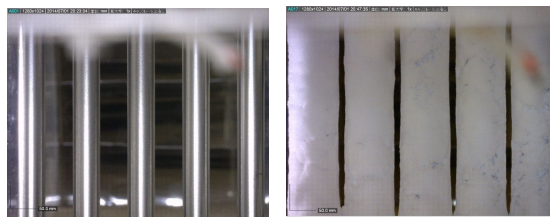


図6 複合サイクルの熱効率

(5) 空気液化用熱交換器の基礎実験

本研究では理論解析に加え、空気液化用熱交換器の試作を行い、液体窒素冷媒を用いて基礎実験を実施した。実験の結果、実用化に当たり、熱交換器冷却管に発生する霜が大きな技術的課題となることが明らかになった。図7に、実験前と実験後の熱交換器の着霜の様子を示す。

着霜の問題を解決するため、いくつかの対策を検討した。そのうち、冷却管上流に障害物を配置する方法が有効であることが分かった。この方法の概念図を図8に示す。冷却管の上流にV字型の断面をもつ障害物を配



実験前

実験後

図7 熱交換器の着霜の様子



図8 障害物の配置による着霜の抑制

置することにより、水蒸気を含む主流が直接冷却管に衝突するのを防ぐ。図9に、障害物を配置した場合の着霜の様子を示す。障害物有の場合の映像は、試験終了後に障害物を取り外して撮影を行っている。障害物を配置することにより、冷却管前方にほとんど着霜が見られなくなることがわかる。

図10に、障害物を配置した場合の熱交換量の変化を示す。無着霜状態では、障害物の配置により前方の熱交換が阻害されるため、熱交換量は減少する。一方、着霜を伴う場合、障害物の配置により前方の着霜が抑制されるため、この位置における熱交換量の低下を抑えることができる。結果として、障害物を配置しない場合を上回る熱交換量が得られることが分かった。

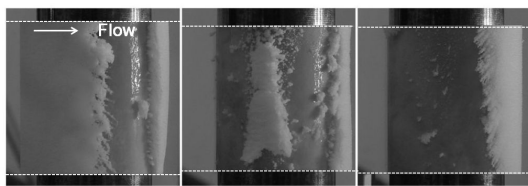


図9 障害物の配置による着霜の様子の違い。左から障害物なし、小型の障害物を配置した場合、大型の障害物を配置した場合

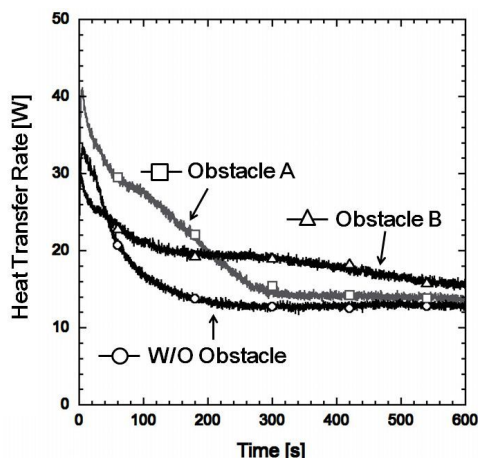


図10 障害物の配置による熱交換量の変化。Obstacle A: 小型の障害物, Obstacle B: 大型の障害物

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

佐藤颯大, 吹場活佳, 園部誕紀, 山田悠太, V字型障害物を用いた極低温冷却円管の着霜低減, 日本冷凍空調学会論文集, 査読有, Vol.31, 2014, No.2, 169-177

〔学会発表〕(計9件)

Kataoka, K., Fukiba, K and Hirata, K, Improvement of heat efficiency of combined cycle power plant with use of air liquefying cycle, Joint Symposium among Sister Universities in Mechanical

Engineering 2014, August 15, 2014, Kaiko Kinen Kaikan(Kanagawa, Yokohama)

片岡健太, 吹場活佳, 平田邦夫, 空気液化サイクルの付加による複合火力発電システムの熱効率の向上, 第19回動力・エネルギー技術シンポジウム, 6月26日, 2014, オオッサ(福井県福井市)

N. Sonobe, K. Fukiba, S. Sato, Improvement of Defrosting Method for Cryogenic Heat Exchanger Using Impingement of Alumina Particles, 11th International Conference on Flow Dynamics, October 8, 2014, Sendai International Center(Miyagi, Sendai)

N. Sonobe, K. Fukiba, S. Sato, Fundamental Experiment on Jet Defrosting of Cryogenic Heat Exchanger, Asian Congress on Gas Turbines 2014, August 18, 2014, Seoul(Korea)

佐藤颯大, 吹場活佳, 園部誕紀, 吉村祐亮, 極低温冷却円管への着霜に及ぼす障害物形状の影響, 平成26年度宇宙輸送シンポジウム, 1月15日, 2015, 宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

園部誕紀, 吹場活佳, 佐藤颯大, アルミナ粒子衝突を用いた極低温熱交換器の除霜に関する基礎実験, 2014年度日本冷凍空調学会年会, 9月11日, 2014, 佐賀大学(佐賀県佐賀市)

佐藤颯大, 吹場活佳, 園部誕紀, V字型障害物を用いた極低温冷却円管の着霜低減と障害物距離の影響, 2014年度日本冷凍空調学会年会, 9月11日, 2014, 佐賀大学(佐賀県佐賀市)

園部誕紀, 吹場活佳, 山田悠太, 佐藤颯大, ジェットを用いた極低温熱交換器の除霜に関する基礎実験, 第51回伝熱シンポジウム, 5月22日, 2014, アクトシティ(静岡県浜松市)

佐藤颯大, 吹場活佳, 山田悠太, 園部誕紀, V字型障害物による極低温熱交換器の着霜抑制, 第51回伝熱シンポジウム, 5月22日, 2014, アクトシティ(静岡県浜松市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

平田 邦夫 (Hirata, Kunio)

静岡大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60422739

(2)研究分担者

吹場 活佳 (Fukiba, Katsuyoshi)
静岡大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50435814